

高炉水砕スラグを利用した空洞充填材 「スマートグラウト®」の開発

Development of Filler for Underground Cavities “SMART GROUT” Using Granulated Blast Furnace Slag

林堂 靖史 HAYASHIDO Yasushi JFE スチール スチール研究所 土木・建築研究部
篠原 雅樹 SHINOHARA Masaki JFE スチール 東日本製鉄所（京浜地区）設備部土木・建築室 主任部員（課長）
吉武 英樹 YOSHITAKE Hideki JFE スチール スラグ事業推進部主任部員（課長）

要旨

地震による液状化や圧密沈下で生じる建築物基礎下の空洞は、地盤の陥没や構造物の傾斜といった被害の要因となるため、空洞充填材による埋戻しが行なわれている。基礎下空洞への充填材として、鉄鋼スラグの一種である高炉水砕スラグを使用した空洞充填材「スマートグラウト®」の開発を行なった。室内試験による配合検討、実機プラントを用いた施工試験による圧送性、施工性の実証を行なった結果、200 m 以上の圧送が可能であり、水中施工時にも分離せずに打設可能であることが分かった。

Abstract:

The liquefaction and consolidation cause ground subsidence and underground cavities. Because the cavities can be a possible cause of troubles such as caving or declination of the building, they are usually filled with some kind of filler. JFE Steel developed the filler for underground cavities called “SMART GROUT” using granulated blast furnace slag. By a laboratory mixing test and a field test using actual equipment, it was clarified that “SMART GROUT” could be pumped out more than 200 m and cast in the water firmly.

1. はじめに

軟弱地盤の圧密沈下や地震による地盤の液状化によって、地盤と建築物基礎や道路との間に空洞が生じることがある。空洞は、地盤の陥没や構造物の傾斜といった被害の原因となるため、充填材の注入による埋戻しが行なわれている¹⁾。基礎床など設けた注入孔からの充填材の注入は、大規模な掘削を伴うことなく修復することができるという特長があるため、広く一般的に利用されている工法である。充填材には、施工時には良好な流動性、施工後には地盤と同程度の強度特性が要求され、従来は、砂やセメント系固化材が主材料として用いられていた。しかし、天然資源の消費を抑制し、環境負荷を低減するために、リサイクル材料の利用が求められていた。そこで、鉄鋼スラグの一つ、高炉水砕スラグを利用した空洞充填材「スマートグラウト®」を開発した。

高炉水砕スラグは、天然の砂とほぼ同じ粒度分布であるため、充填材の骨材として利用可能である。また、アルカリなどの刺激作用によって水と反応して水和物を生成する潜在水硬性を有し、強度発現に寄与するため、セメントの配合量の低減、天然材の代替による環境負荷の低減が期待で

きる。

本稿では、「スマートグラウト®」の基本特性と、現場での適用性について述べる。

2. 空洞充填材の要求性能

図1に示すように、基礎下空洞の充填工事では、基礎スラブに注入孔を設け、注入管より圧送された充填材を空洞部に注入していく方法で行なわれる。このような基礎下空洞への充填材料には、以下の性能が要求される。

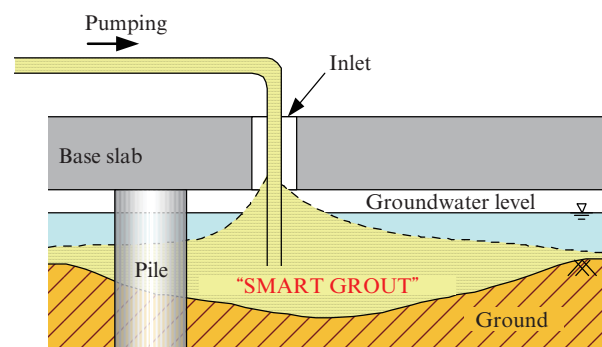


図1 基礎下空洞充填工事の概要

Fig. 1 Schematic view of casting “SMART GROUT”

表1 「スマートグラウト®」の要求性能と品質確認
Table 1 Required Performances and test items of "SMART GROUT"

項目	要求性能	品質確認項目	目標値
(1) 材料強度	地盤と同程度の強度, 杭に付着なし	一軸圧縮強さ	0.1 N/mm ² 以上 (28 日養生)
(2) 流動性	隙間なく充填かつ長距離圧送可能	フロー値	210 mm 以上
(3) 水中施工性	材料分離をすることなく施工可能	ブリージング率	5.0% 以下
	水面に浮遊せず, 充填可能	単位体積重量	1.0 g/cm ³ 以上

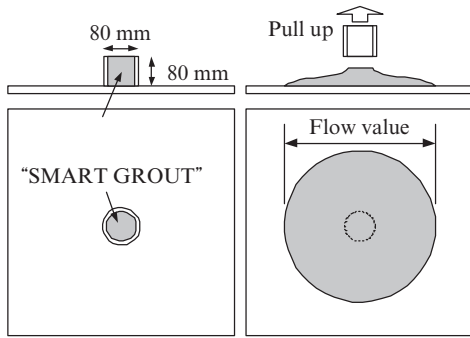


図2 フロー試験の方法
Fig. 2 Flowing test method



写真1 フロー試験の様子
Photo 1 Overview of flow test

- (1) 地盤と同程度の材料強度
- (2) 長距離圧送が可能で, 空洞を隙間なく充填できる流動性
- (3) 空洞に地下水が存在する場合を想定した水中施工性

充填材の強度特性は, 設計の考え方により要求性能が異なるが, 今回は地盤と同程度の強度 (28 日養生後の強度で 0.1~0.5 N/mm² 程度) とした。これは, 現地盤と同程度の材料強度があれば, 空洞の修復として十分であり, 基礎スラブや杭に対して十分な地盤反力が得られるためである。一方, 充填材の強度が過大になると, 基礎杭への付着が生じる。充填材が基礎杭へ付着すると, さらなる沈下が発生した場合に, 充填材と地盤との間に空洞が生じ修復が困難となることや, 基礎杭への荷重となり, 杭の支持力や杭体に発生する応力を再検討する必要がある。また, 埋設管などへの悪影響を与えないためにも, 充填材の強度は地盤と同程度であることが望ましい。

充填材の施工には, 空洞を隙間なく充填することができ,

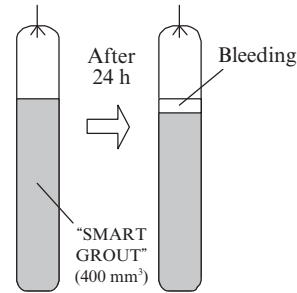


図3 ブリージングの方法
Fig 3 Bleeding test method

混練プラントから注入場所までの圧送管内をスムーズに流すことができる十分な流動性が要求される。一方, 流動性を高くすると, 材料分離が生じる可能性があり, 圧送管の目詰りや充填時の性能が低下する恐れがある。流動性を確認するために, フロー試験 (図2, 写真1), 分離抵抗性を確認するために, ブリージング試験 (図3) を実施した。

圧密沈下や液状化が生じやすい場所は, 地下水位が地表に近い場合, 空洞部に地下水が存在することが多い。そのような場所に施工することを考慮すると, 水中でも充填材が材料分離しないこと, 水以上の単位体積重量を有し, 地下水面に浮遊せずに充填可能であることが必要である。

既存技術であるマイクロサンドエアモルタル²⁾の要求性能を参考に, 「スマートグラウト®」の要求性能と品質確認項目を表1のように設定し, 室内試験により要求性能を満足する配合条件を検討した。

3. 室内試験による配合検討

配合に使用した材料は, 骨材としての高炉水砕スラグ (粒径 5 mm 以下に粒度調整, 写真2), 固化材としての高炉セメント (B 種), 材料分離の低減材としてのベントナイト, 軽量化による施工性向上のための起泡剤, および水とした。

図4に今回使用した高炉水砕スラグとコンクリート細骨材用砕砂の粒度分布の例を示す³⁾。図4より, 高炉水砕スラグは, コンクリート細骨材用の砂と同等の粒度分布であることが分かる。しかしながら, 高炉水砕スラグは, 砂と比べると粒が角張っているため流動性が低下し, 材料分離が生じる傾向にあった。そこで, 材料分離を防ぐためにベントナイトを用いることとした。ベントナイトは粘土鉱物であるの

表 2 室内試験の配合条件と試験結果
Table 2 Mixture proportion and test result

Mixture number	Mixture proportions (kg/m ³)					Test results				
	Granulated blast furnace slag	Slag cement	Bentonite	Frothing agent	Water	Flow value (mm)	Bleeding (%)	Unit weight (kN/m ³)	Compressive strength (N/mm ²)	
									Curing for 7 days	Curing for 28 days
1	958	107	18	0.63	353	218	6.3	1.48	0.114	0.269
2	689	77	26	0.50	510	344	21.6	1.71	0.125	0.403
3	705	46	46	0.50	507	244	0.4	1.33	0.055	0.229
4	622	34.5	34.5	1.00	346	211	0.0	1.01	0.026	0.069



写真 2 高炉水砕スラグの概観

Photo 2 Granulated blast furnace slag

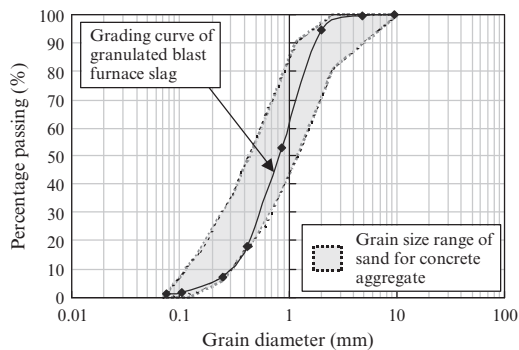


図 4 高炉水砕スラグの粒度分布

Fig. 4 Grain size distribution of granulated blast furnace slag

で、充填材の粘性を増加させ、材料分離の低減が可能である。さらに、流動性を増すために、起泡剤より作成される気泡を混入し、軽量化、圧送性の向上を図った。

表 2 に室内試験を実施した主な配合条件と試験結果を示す。ここで、配合 No. 1, 2 は、既存の基礎下空洞充填材の配合^{1,2)}を参考に、骨材を高炉水砕スラグに置き換えたものとした。配合 No. 3, 4 は配合 No. 1, 2 の試験結果から高炉セメント、起泡剤の配合量を調整したものとした。試験の結果、配合 No. 3 において材料強度、流動性、水中施工性すべての目標値を満足したため、この配合を基本配合とした。一方、28 日強度は 7 日強度の 2~4 倍程度であり、一般的なセメント系固化材と比較して強度の伸びが大きくなっている。これは、高炉水砕スラグの潜在水硬性がセメントの水和反応と比較して遅いためと考えられる。

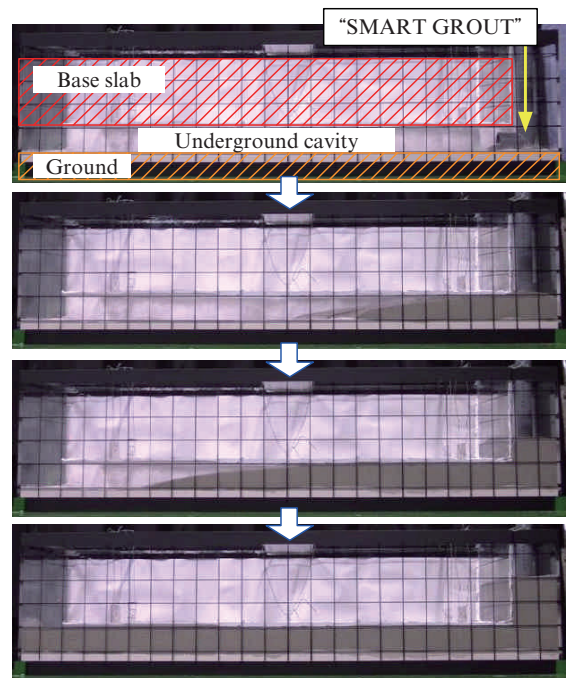


写真 3 流動性可視化試験の様子

Photo 3 Visualization of fluidity

4. 室内試験による施工性の検証

4.1 流動性の可視化

「スマートグラウト®」の流動性を確認するため、水槽に地下空洞を模擬した模型を作成し、「スマートグラウト®」を流し込む可視化試験を実施した。水槽は幅 300 mm×高さ 300 mm×長さ 1200 mm で、空洞部として 50 mm の隙間を設けた。底部には乾燥地盤を想定して珪砂を敷き詰めた。写真 3 に示すように、No. 3 の配合で作成された「スマートグラウト®」を右側から注入すると、空洞部を 1000 mm 先まで流動し、隙間なく充填されることを確認した。

4.2 施工所要時間と流動性の評価

現地施工では、混練プラントから注入現場まで距離がある場合など、混練から注入までにタイムラグが生じる場合がある。そこで、経時的な流動性の変化を確認するため、表 2 に示す No. 3 の気泡を混合しない配合で、混練後に攪拌し続

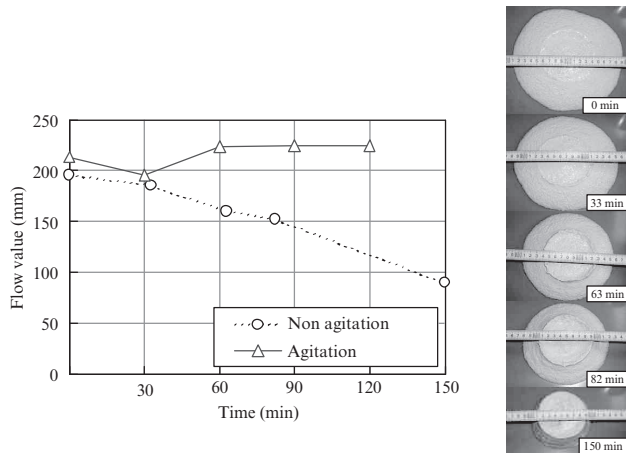


図5 フロー値の時間変化

Fig. 5 The relation between curing time and flow value

けた場合と攪拌を行わない場合とでのフロー値の比較を実施した。フロー値の時間変化を図5に示す。攪拌を行わない場合、混練直後のフロー値は196 mmであったが、150分経過後に実施したフロー試験では90 mmまで低下していた。「スマートグラウト®」は、高炉セメント（B種）を使用しているため、混練後、時間の経過に伴い水和反応が進み、流動性が低下したものと考えられる。一方、混練後に攪拌し続けた場合では、混練後120分までフロー値が低下しないことが確認できた。これにより、現地施工では、アジテート車により練り返しを続けながら輸送し、現地で気泡混合すれば、混練直後の流動性を保った状態で施工することができると思われる。

4.3 水中施工性の検証

「スマートグラウト®」の水中での施工性を確認するために、水を張った水槽に「スマートグラウト®」を流し込む可視化試験を実施した。水槽は幅300 mm×高さ300 mm×長さ600 mmで、200 mmの高さとなるようにインクで着色した水の中に「スマートグラウト®」を注入した。注入直後は混練されていた気泡が分離し、水面に浮いてくる現象が見られたため水に濁りが生じたが、注入速度が安定すると、水槽底面から水を押し出しながら充填される様子が確認され、水中でも分離することなく施工可能であることが分かった（写真4）。

また、施工後28日間水中養生をした「スマートグラウト®」のコア抜きを実施し、一軸圧縮試験を行なった。その結果、 0.149 N/mm^2 となり、気中養生を行なった試験体の一軸圧縮強さ 0.229 N/mm^2 の6割程度まで低下しているものの、目標強度である 0.1 N/mm^2 以上となることを確認した。

5. 実機プラントを用いた現場施工試験

「スマートグラウト®」の現場での混練性、圧送性、およ

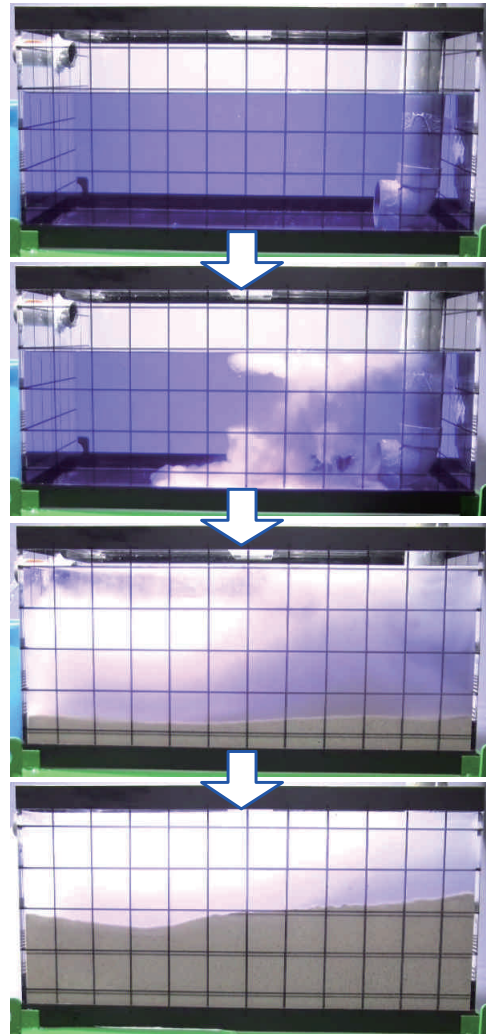


写真4 水中施工可視化試験の様子

Photo 4 Visualization of casting in water

び水中施工性を確認するために、実機プラントを用いた施工試験を実施した。図6に施工プラントの配置、写真5に施工プラントの概観を示す。配合条件は表2のNo. 3とし、 1 m^3 のバッチ式ミキサーで合計 13 m^3 の混練を行なった。施工手順は、高炉水砕スラグ、高炉セメント、ベントナイト、水をミキサーに投入・混練してモルタル状とし、スクイズポンプで100 m圧送した後、起泡装置により作製された起泡群をモーター付きのラインミキサーを用いて混合、さらに100 m圧送後、水中へと注入した。起泡混合の位置、ラインミキサーの設置により気泡がうまく混合され、最大200 mの圧送が可能であった。また、写真6に示すように、水中でも分離することなく打設できることも確認した。

圧送後の「スマートグラウト®」についてサンプルを採取し、一軸圧縮試験を実施した結果を図7に示す。一軸圧縮強さは最大で2倍程度のバラツキは見られるが、すべてにおいて目標性能を満足する結果が得られ、混練の均一性を確認した。

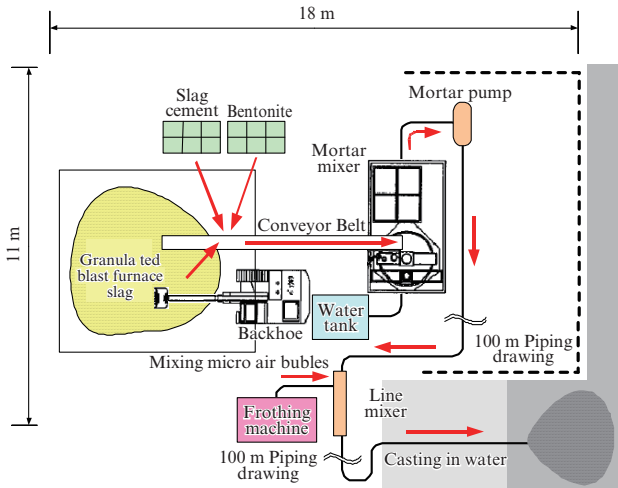


図6 施工プラントの配置図
Fig. 6 Layout of mixing plants



写真5 施工プラントの概観
Photo 5 Overview of mixing plants

6. おわりに

「スマートグラウト®」は高炉水砕スラグを用いた空洞充填材であり、下記の特長を有する。

- (1) 鉄鋼製品の副産物である高炉水砕スラグを利用するため、環境負荷が低減され、材料費を抑えることができる。
- (2) 高炉水砕スラグは潜在水硬性を有するため、セメント配合量を低減することができる。
- (3) 起泡剤による気泡量を変化させることで材料の単位体積重量をコントロールすることができる。
- (4) ベントナイトを配合することで材料分離を抑制し、水中でも分離することなく施工できる。

室内試験により要求性能を満足する「スマートグラウト®」の配合を検討し、流動性の時間的な変化の確認、水中施工時の分離状況の確認を行なった。また、実機プラントを用いた施工試験により圧送性、および水中施工性の確認を行なった。その結果、最大200mの圧送が可能であり、水中打設でも分離することなく施工できることを確認した。

東日本大震災では多くの地域で地盤の液状化が生じ、地下にも空洞が発生しているといわれており⁴⁾、今後は修復工



写真6 水中施工時の様子
Photo 6 Casting in water

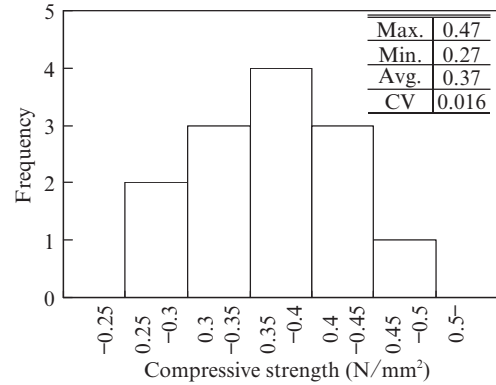


図7 一軸圧縮強さのバラツキ
Fig. 7 Dispersion of compressive strength

事の要望が増えると考えられている。

「スマートグラウト®」は、鉄鋼製品の副産物を利用することにより従来の工法に比べるとセメント使用量ならびに自然砂使用量を減らすことができる「環境負荷を低減した工法」であり、修復工事での採用を図るべく工法の提案を行なっていきたい。

参考文献

- 1) 軽量混合処理土工法技術マニュアル（改訂版）. 沿岸技術センター, 2008.07.
- 2) 木寺謙爾, 中川茂, 田村徹, 轟丈詩, 森山紀夫. くい基礎における地盤沈下対策—マイクロサンドエアモルタル工法—. 建築技術, 1980-11.
- 3) 2010年制定コンクリート標準示方書（標準編）. 土木学会.
- 4) 東北地方太平洋沖地震による関東地方の地盤液状化現象の実態解明報告書. 国土交通省関東地方整備局・地盤工学会, 2011.



林堂 靖史



篠原 雅樹



吉武 英樹